

# 基于广义回归神经网络提取布里渊谱的应变特征

张志辉 张 鹏\* 韩顺利

(中国电子科技集团公司第四十一研究所电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

**摘要** 基于光纤应变分布与布里渊散射谱频移的关系,提出了利用广义回归神经网络提取布里渊谱的应变特征方法。将布里渊谱的频率、增益分别作为广义回归神经网络的输入矢量和目标矢量,对广义回归神经网络进行训练和仿真,计算出调节权值和阈值,从而获得更加精确的布里渊谱频移。仿真实验结果和理论分析表明,与非线性最小二乘法、反向传播神经网络、径向基函数网络预测布里渊谱的应变特征相比,广义回归神经网络能够获得更精确的布里渊谱特征,相应的光纤应力误差最小,在 1% 之内。

**关键词** 光纤光学; 布里渊谱; 广义回归神经网络; 光纤传感器

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s105008

## Strain Characteristic Extraction of Brillouin Spectrum Based on General Regression Neural Network

Zhang Zhihui Zhang Peng Han Shunli

(*Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China*)

**Abstract** The method of extracting Brillouin spectrum characteristics by using the general regression neural network is proposed based on the relationship between the optical fiber strain and the Brillouin spectrum frequency shift. The Brillouin spectrum frequency shift and gain are taken as the input vector and target vector of general regression neural network, respectively. Then the general regression neural network is trained and simulated. The more accurate Brillouin spectrum frequency shift can be calculated with the obtained weight and threshold. Experimental results and theoretical analysis show that the Brillouin spectral feature and optical fiber strain obtained by using the general regression neural network are more accurate compared with the nonlinear least square method, back propagation neural network and radial basis function network, and the corresponding optical fiber strain error is the least (within 1%).

**Key words** fiber optics; Brillouin spectrum; general regression neural network; optical fiber sensor

**OCIS codes** 060.2300; 060.2310; 060.2330

## 1 引 言

分布式光纤传感器具有抗电磁干扰性强、无辐射、化学稳定性好等优点,可以在沿光纤路径上同时得到被测量场在时间和空间上的连续分布信息<sup>[1-3]</sup>。其中,布里渊光时域反射(BOTDR)技术是基于自发布里渊散射的分布式光纤传感技术<sup>[4-6]</sup>,利用光波在光纤中传播时产生的后向散射光的频移谱、功率谱特征与温度、应变等外界环境的相互关系,通过获得频偏值和相对功率变化量,可以实现从

光纤单端探测传感光纤的轴向应变分布及断点<sup>[7]</sup>,在电力电缆、通信光缆、隧道、输油管道和大坝等大型的工程项目和基础设施建设的健康检测中具有很好的应用前景<sup>[8-9]</sup>。

通过测量布里渊散射光的频移可以获知光纤中温度和应力的变化,因此,通过准确拟合 BOTDR 采集的布里渊散射光谱离散数据来获取频移量的方法是非常重要的<sup>[10]</sup>。目前,常用的拟合布里渊谱离散数据的方法有非线性最小二乘算法(LM)<sup>[11]</sup>和神经

收稿日期: 2013-06-18; 收到修改稿日期: 2013-09-04

作者简介: 张志辉(1970—),男,本科,高级工程师,主要从事光纤技术方面的研究。E-mail: eiqd@ei41.com

\* 通信联系人。E-mail: 364113561@163.com

网络逼近算法。在 LM 算法中,通常假设采集的布里渊谱离散数据符合洛伦兹线型分布,然而由于光纤中自然展宽、多普勒展宽等现象的存在,布里渊谱并不完全符合洛伦兹分布<sup>[12]</sup>,因此采用 LM 算法拟合布里渊谱的精度有限。在神经网络逼近算法中,常用的神经网络有反向传播神经网络(BPNN)和径向基函数网络(RBFN)。BPNN 是一种全局逼近网络,基于梯度下降的误差反向传播算法进行学习,所以其网络训练速度通常很慢,而且很容易陷入局部极小点<sup>[13]</sup>。RBFN 是一种局部逼近网络,具有学习速度快、逼近能力高等优点。然而,正是由于 RBFN 具有逼近能力高的优点,RBFN 能够以任意精度逼近含有噪声的布里渊谱离散数据,对样本数据实现了“过度匹配”,不具有较好的推广能力。

广义回归神经网络(GRNN)是 RBFN 的一种变型,具有局部逼近、训练方法快等优点,扩展常数的选取和输入数据的平均间距相当即可,能够以任意精度逼近一个平滑函数,对噪声不太敏感,具有较好的推广能力。因此,本文提出一种利用 GRNN 提取布里渊谱特征的方法,能够获得高精度的光纤应变分布。

## 2 GRNN 的基本结构及原理

图 1 为以 GRNN 逼近布里渊谱的结构图,其结构与 RBFN 较为相似,仅在输出的线性层与 RBFN 有一些不同,但不需要设定模型形式,根据概率最大原则计算网络输出,模型泛化性能好,非常适合于函数的逼近<sup>[14]</sup>。

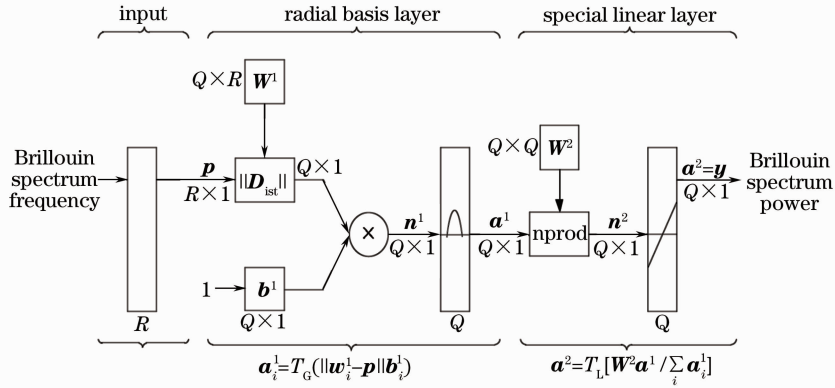


图 1 以 GRNN 逼近布里渊谱的结构图

Fig. 1 Structure chart of GRNN to fit the Brillouin spectrum

GRNN 分为输入层、隐含的径向基层和线性输出层。 $R$  是 GRNN 的输入矢量  $p$  的维数, $Q$  是神经元的个数。在利用 GRNN 逼近布里渊谱的算法中, $R=1$ ,根据本振的扫频范围及扫频间隔调整  $Q$ 。权值矢量为  $W^1$ ,阈值为  $b^1$ ,  $\|D_{ist}\|$  表示求取输入矢量和权值矢量的距离,则隐层节点的输入  $n^1$  为

$$n^1 = \|W^1 - p\| b^1. \quad (1)$$

在利用 GRNN 逼近布里渊谱的算法中,径向基隐层的传递函数采用高斯函数,表达式为

$$T_G(n) = \exp(-n^2). \quad (2)$$

高斯函数是一种局部分布对中心径向对称衰减的非负非线性函数,因此当输入信号靠近基函数的中央范围时,隐层结点将产生较大的输出,所以 GRNN 具有局部逼近能力和较快的学习速度。

由(1)式可知,经过高斯传递函数之后,隐层节点  $i$  的输出为

$$a_i^1 = T_G(\|W_i^1 - p\| b_i^1), \quad (3)$$

式中  $a_i^1$  是隐层输出矢量  $a^1$  的第  $i$  个元素, $b_i^1$  是隐层

阈值矢量  $b^1$  的第  $i$  个元素, $W_i^1$  是第  $i$  个隐层神经元的权值矢量。 $W_i^1$  确定了径向基函数的中心,当输入矢量  $p$  与  $W_i^1$  重合时,径向基函数神经元的输出达到最大值。当输入矢量  $p$  距离  $W_i^1$  越远时,神经元输出就越小。 $b_i^1$  确定了径向基函数的宽度,当  $b_i^1$  越大,则输入矢量  $p$  在远离  $W_i^1$  时函数的衰减幅度就越大。

特殊线性层为输出层,利用特殊的线性函数对输入模式做出响应,nprod 为规范化点积函数,计算网络的向量  $n^2$ ,它的每个元素就是向量  $a^1$  和权值矩阵  $W^2$  每行元素的点积再除以向量  $a^1$  的各元素之和得到的,其结果提供给线性传递函数  $T_L$ ,得到的输出为

$$a^2 = T_L \left[ \frac{W^2 a^1}{\sum_i a_i^1} \right]. \quad (4)$$

为降低运算的复杂性,在利用 GRNN 逼近布里渊谱的算法中,隐层中的所有神经元均采用相同的阈值,训练过程要对阈值  $b^1$  进行寻优,根据扫频间隔进行调整以保证径向基神经元的响应在输入空间能够交迭,在逼近和平滑之间取得平衡。确定阈值  $b^1$  后,将

归一化后的实测布里渊谱增益作为目标样本矢量，就可以得到权值矢量  $W^1$  和  $W^2$ ，最终通过计算就能获得较为逼近的布里渊谱增益。

### 3 光纤应变分布测试

#### 3.1 布里渊谱仿真与特征提取

实际测得的布里渊谱线型是介于洛伦兹和高斯线

型之间的，而且由于受到环境及系统其他部件的影响，布里渊散射谱往往带有噪声<sup>[15]</sup>。根据布里渊散射谱的实际特性，利用 Matlab 仿真得到带有一定强度高斯白噪声的布里渊散射谱，仿真的信噪比与多次实际测量信噪比的平均值相当，仿真的布里渊散射谱介于洛伦兹和高斯线型之间，中心频率为 11.2 GHz，如图 2 中“·”线型所示，左上角为局部放大图。

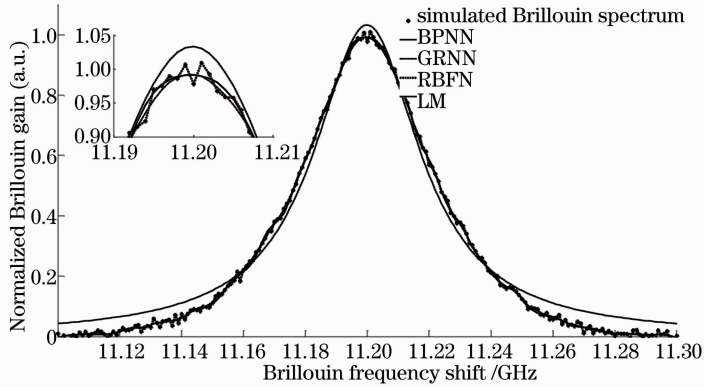


图 2 采用不同算法得到的布里渊谱拟合曲线

Fig. 2 Fitting results of Brillouin spectrum by different algorithms

分别采用 LM、BPNN、RBFN 和 GRNN 算法对仿真的布里渊散射谱进行拟合，以布里渊散射谱的频率、增益分别作为神经网络的输入矢量和目标矢量，对神经网络进行学习、训练和仿真，得到如图 2 所示的拟合结果。由图 2 可知，通过 LM 算法拟合得到的布里渊谱拟合度较差，RBFN 存在“过度训练”现象，对训练样本集达到了较高的匹配效果，推广能力较差。表 1 为采用这些算法提取的布里渊谱特征、拟合得到的布里渊谱与理想布里渊谱的标准偏差和算法运行时间。由表 1 可知，LM 算法运行

效率稍微比 GRNN 高了一点，但是通过 LM 算法拟合得到的布里渊谱与理想布里渊谱之间的标准偏差最大，因此获得的布里渊谱频率精度不如 GRNN；在利用神经网络计算布里渊谱的频率算法中，不论是运行效率，还是得到的布里渊谱频率的精度，GRNN 都是最好的。在此仿真事例中，BPNN 的神经元数目是 21 个，远小于训练样本集(201 个数据)的大小，不会发生“过度训练”现象，因此采用 BPNN 获得的布里渊谱频率精度比 RBFN 高，但是 BPNN 的计算效率远小于 GRNN。

表 1 采用不同算法提取的布里渊谱特征

Table 1 Features of Brillouin spectrum obtained by different algorithms

Algorithm	Center frequency /GHz	Standard deviation /%	Time /ms
LM	11.1992	3.92	85.6
BPNN	11.1999	0.66	1106.9
RBFN	11.1995	0.91	118.2
GRNN	11.2000	0.41	113.4

#### 3.2 实验验证与分析

为了进一步验证 GRNN 在测量光纤应变分布中的优势，搭建了光纤应变测试实验系统，如图 3 所示。窄线宽激光光源发出连续相干光被光耦合器(OFC)分成探测光和参考光，其中参考光作为光学本振光。对探测光进行脉冲调制，经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后，由 OFC 注入被测光纤，光纤中返回的散射光与参考光相干后，其拍频光信号由光

电探测器转换为电信号，与压控振荡器(VCO)输出的扫描频率混频，通过低通滤波器(LPF)后由模数转换器(A/D)采样，构建被测光纤中各点的布里渊频谱，进行分析得到布里渊频移，根据光纤应力与布里渊频移的线性关系得到光纤的应力分布。

为验证实验结果，采用经过计量的光纤光栅解调仪(OFGDI)的应力测量结果做为标准，将光纤光栅粘贴在光纤应变标准件上，利用光纤应变标准件直接对

光纤光栅进行轴向拉伸,在相同测试条件下分别采用 光纤应变测试实验系统和 OFGDI 进行测试。

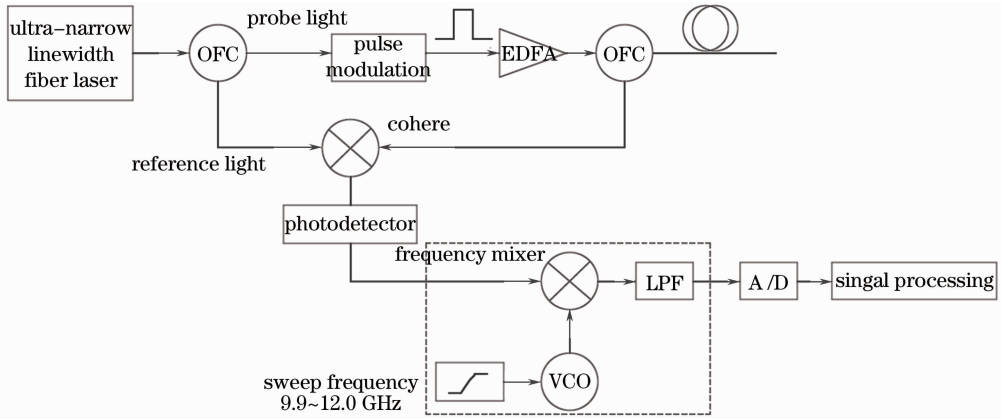


图 3 光纤应变测试实验系统

Fig. 3 Experimentd system to test the optical fiber strain

实验中,光纤折射率为 1.4720,工作温度为 25 ℃,量程为 2 km,取样分辨率为 0.1 m,脉宽为 50 ns,扫频范围为 10.55~11.25 GHz。在数据处理中,采用操作系统为 Microsoft Windows XP Professional 的 PC 机, CPU 为 Pentium(R) Dual-Core E5800 @ 3.2 GHz,内存为 2.0 GB,采用 C++ 开发软件,以 COM 组件的方式调用 Matlab 模块完成复杂的计算功能。

当扫频间隔为 5 MHz 时,粘贴在光纤应变标准件上的光纤内嵌光栅所在位置 0.08656 km 处测量得到的布里渊散射谱如图 4 中“·”线型所示。利用不同算法对测量得到的布里渊散射谱进行拟合,获

得频移后根据光纤应变与频移的线性关系得到的光纤应力如表 2 所示。为了进一步验证本文方法的有效性和优越性,研究本文方法在不同距离处对光纤应力测量结果的影响,采用同样的方法,对另外两处光纤位置的应力进行了测试,测量位置及应力见表 2。另外,为了便于比较本文方法测试结果的准确性,表 2 还提供了在相同实验条件下利用光纤光栅解调仪测试不同点处的光纤应力。在相同的实验条件下,通过多次测量,利用不同算法提取布里渊散射谱的应变特征,具有较好的一致性,由于篇幅所限,不再详细叙述。

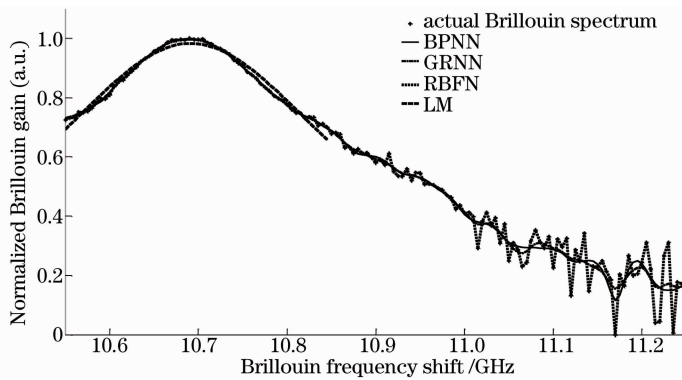


图 4 不同算法对实测的布里渊谱拟合结果

Fig. 4 Fitting results of measured Brillouin spectrum by different algorithms

表 2 扫频间隔为 5 MHz 时不同位置处的光纤应力

Table 2 Optical fiber strains of different locations with 5 MHz frequency intervals

Distance /km	Parameter	LM	BPNN	RBFN	GRNN	OFGDI
0.08656	Strain / $\mu\epsilon$	2763	2689	2730	2723	2713
	Time /ms	23.9	666.9	111.2	109.9	
0.21130	Strain / $\mu\epsilon$	2721	2659	2679	2643	2625
	Time /ms	26.2	643.7	110.9	105.9	
1.26780	Strain / $\mu\epsilon$	2766	2674	2726	2718	2697
	Time /ms	21.3	645.2	113.8	110.2	

由图 4 可知,由于 LM 算法是针对指定洛伦兹线型进行拟合,而实验测量的布里渊散射谱并不完全符合洛伦兹线型,使得由 LM 算法拟合获得的布里渊散射谱失真度较大,导致提取的频移误差较大,因此根据频移计算得到的光纤应力误差也较大。通过 RBFN 拟合获得的曲线基本匹配了每一点实验数据,存在过度拟合现象,影响布里渊散射谱频率的提取精度,从而降低了光纤应力的测量准确度。BPNN 拟合曲线失真度虽小,但是效率最低,不利于对信号的实时性处理。GRNN 具有最好的拟合效果,为精确提取布里渊散射谱的频率奠定了基础,实用性较强。实验结果表明,利用 GRNN 提取布里渊

表 3 不同扫频间隔下 0.08656 km 位置处的光纤应力

Table 3 Optical fiber strains at 0.08656 km with different frequency intervals

Frequency interval /MHz	Parameter	LM	BPNN	RBFN	GRNN
5	Strain / $\mu\epsilon$	2763	2689	2730	2723
	Time /ms	23.9	666.9	111.2	109.9
10	Strain / $\mu\epsilon$	2769	2675	2741	2693
	Time /ms	22.3	680.0	110.2	107.4
20	Strain / $\mu\epsilon$	2774	2659	2781	2740
	Time /ms	21.6	575.9	110.9	106.9

由表 3 可知,随着扫频间隔的增大,神经网络的训练样本数逐渐减少,使用 BPNN、RBFN 和 GRNN 提取布里渊散射谱的特征精度逐渐降低,从而使得光纤应力的检测精度也在逐渐降低。由于扫频间隔的增大,减少了实验采样数据,利用 LM 算法拟合布里渊散射谱,获得的曲线更加平滑,增加了失真度,从而降低了布里渊散射谱特征的提取精度,减少了光纤应力的检测精度。在扫频间隔为 5、10、20 MHz 下,利用本文方法计算得到的光纤应力与光纤光栅解调仪测量结果最接近,误差分别为 0.36%、0.74%、0.99%,满足实际工程需求,具有较好的实用性。另外,本文方法计算效率仅次于 LM 算法,满足实时性测量要求,在扫频间隔增大的情况下,测量准确性的优势更加明显。

## 4 结 论

基于 GRNN 具有较好的推广能力,提出了采用 GRNN 获取布里渊散射谱频移的方法,与 LM、BPNN 和 RBFN 算法相比,该方法得到的光纤应力更加精确,误差小于 1%,满足实际需求。实验结果表明 GRNN 在布里渊分布式光纤传感系统中的应用是可行的,此方法不仅可解决 LM 算法拟合精度低的问题,还可解决 BPNN 效率低的问题、避免了

散射谱的特征,获得的光纤应力与实际最接近,在 0.08656、0.2113、1.2678 km 处的光纤应力测量误差分别为 0.36%、0.69%、0.78%,测量误差较小,满足实际工程应用需求,计算效率仅次于 LM 算法,与理论仿真结果一致,从而在实验中证实了 GRNN 在提取布里渊散射谱特征中的可行性和优越性。

为了研究不同训练样本数对光纤应力测量结果的影响,通过调整实验参数,分别采用 5、10、20 MHz 的扫频间隔,对光纤内嵌光栅所在的位置 0.08656 km 处的应力进行了测试,测试结果如表 3 所示。在相同实验条件下利用光纤光栅解调仪测试同一点处的光纤应力为 2713  $\mu\epsilon$ 。

RBFN 的“过度匹配”现象,能够快速获得更准确的布里渊谱频移,对布里渊分布式光纤传感系统传感信息的快速准确提取具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- Liu Lei, Zhang Zhiguo, Zhang Min, *et al.*. Dark pulse Brillouin optical time domain analyzer for km range detection with only one fiber section [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40 (7): 998-1002.  
刘磊, 张治国, 张民, 等. 一种基于暗脉冲光布里渊时域分析仪的延长传感距离的方法[J]. *光子学报*, 2011, 40(7): 998-1002.
- Li Yongqian, Wang Hu, Li Huan, *et al.*. Theoretical model and experimental study of electro optic modulator in Rayleigh BOTDA system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(11): 1286-1291.  
李永倩, 王虎, 李欢, 等. 瑞利布里渊光时域分析系统中电光调制器的理论模型与实验研究[J]. *光子学报*, 2012, 41(11): 1286-1291.
- Peng Jiaobo, Bian Zhenglan, Hao Yunqi, *et al.*. Frequency locking of two DFB lasers for distributed optical fiber sensing applications[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0705001.  
彭交波, 卞正兰, 郝蕴琦, 等. 用于布里渊分布式光纤传感的光学锁频系统[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0705001.
- Liang Hao, Lu Yuangang, Li Cunlei, *et al.*. Study on decoding method of correlation coded pulses based Brillouin optical time-domain reflectometric system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31 (10): 1006002.  
梁浩, 路元刚, 李存磊, 等. 基于相关序列脉冲的布里渊光时域反射测量系统解码方法研究[J]. *光子学报*, 2011, 31(10): 1006002.
- Zhao Xiaodong, Lu Yuangang, Hu Junhui, *et al.*. A wavelength scanning Brillouin optical time domain reflectometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0805003.

- 赵晓东, 路元刚, 胡君辉, 等. 波长扫描型布里渊光时域反射计[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0805003.
- 6 A W Brown, B Colpitts, K Brown. Dark-pulse Brillouin optical time-domain sensor with 20 mm spatial resolution [J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(1): 381-386.
- 7 Huang Minshuang, Huang Junfen. Distributed fiber optic Brillouin sensing technique with frequency shifting [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(9): 1428-1432.
- 黄民双, 黄军芬. 光纤移频分布式布里渊光纤传感技术[J]. 光子学报, 2011, 40(9): 1428-1432.
- 8 H Li, D Li, G Song. Recent applications of fiber optic sensor to health monitoring in civil engineering [J]. Engineering Structures, 2004, 26(11): 1647-1657.
- 9 Jiacheng Hu, Fuchang Chen, Chengtao Zhang, *et al.*. Application of high precision temperature controlled FBG filter and light source self-calibration technique in the BOTDR sensor system[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(7): 072901.
- 10 Liang Hao, Zhang Xuping, Li Xinhua, *et al.*. Design and implementation of data fitting algorithm for Brillouin back scattered-light spectrum data[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(4): 875-879.
- 梁浩, 张旭苹, 李新华, 等. 布里渊背向散射光谱数据拟合算法设计与实现[J]. 光子学报, 2009, 38(4): 875-879.
- 11 Xiao Shanghui, Li Li. New fitting method for Brillouin based scattering spectrum of fiber-optic distributed sensing systems[J]. Optical Technique, 2009, 35(6): 897-904.
- 肖尚辉, 李立. 一种新的光纤布里渊传感散射谱拟合方法[J]. 光学技术, 2009, 35(6): 897-904.
- 12 Liu Yin, Fu Guangwei, Zhang Yanjun, *et al.*. A novel method for Brillouin scattering spectrum of distributed sensing systems based on radial basis function neural networks to extract features [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0206002.
- 刘银, 付广伟, 张燕君, 等. 基于径向基函数神经网络的传感布里渊散射谱特征提取[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0206002.
- 13 Xu Dong, Wu Zheng. The Analysis and Design of System Based on MATLAB 6. x—Neural Network [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. 19-24.
- 许东, 吴铮. 基于 MATLAB 6. x 的系统分析与设计—神经网络[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. 19-24.
- 14 D F Specht. A general regression neural network [J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 1991, 2(6): 568-576.
- 15 He Jianping, Zhou Zhi, Wu Yuanhua, *et al.*. Application of wavelet denoising method in Brillouin optical sensing technique [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(4): 75-80.
- 何建平, 周智, 吴源华, 等. 小波滤波在布里渊光前传感技术中的应用[J]. 光电工程, 2009, 36(4): 75-80.

栏目编辑: 王晓琰